

Sägezahnschwingungen - Frequenzmischung - Formanten

1 Sägezahnschwingungen

Während beim *Theremin* reine Sinusschwingungen und deren Überlagerungen (Schwebung) massgebend waren, sind es beim *Trautonium* Sägezahnschwingungen. Deren Erzeugung kann auf unterschiedlichste Weise erfolgen. Nachfolgend wird das Prinzip und einige Schaltungsvarianten vorgestellt.

1.1 Kippschwingungen mit der Glimmröhre

1) Diese einfachste Variante unter sämtlichen Kippschwingungsgeneratoren wurde meines Wissens beim Urtrautonium angewandt. Nebst der Glimmröhre sind nur noch wenige Bauteile für den Sägezahngenerator erforderlich.

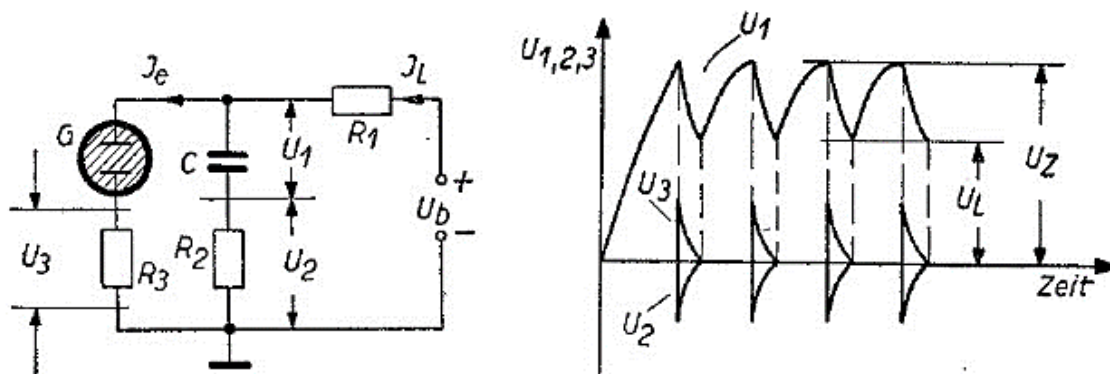


Abb. 1: Glimmröhren-Kippschaltung

Bei Anlegen einer Gleichspannung U_b an die Klemmen wird der Kondensator C über den Widerstand R_1 geladen (R_2 , R_3 werden vorerst als überbrückt betrachtet).

Die Aufladung folgt einer e-Funktion:

$$u = U \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 \cdot C}} \right)$$

Erreicht die Ladespannung den Wert der Zündspannung der Glimmröhre, wird diese leitend und C entlädt sich über den vergleichsweise kleinen Innenwiderstand der Gasentladungsstrecke, solange, bis die Löschespannung unterschritten wird; danach beginnt eine erneute Kondensatoraufladung.

Der Spannungsverlauf am Kondensator bei gezündeter Glimmröhre folgt einer abklingenden e-Funktion:

$$u = U \left(e^{-\frac{t}{R_i \cdot C}} \right)$$

Die sich einstellende Kippfrequenz berechnet sich gemäss:

$$f = \left[C \left(R_1 \cdot \ln \frac{U - U_{\text{lösch}}}{U - U_{\text{zünd}}} + R_i \cdot \ln \frac{U_{\text{zünd}}}{U_{\text{lösch}}} \right) \right]^{-1}$$

Mittels der Widerstände R_2 , R_3 lassen sich zusätzlich positive und negative Nadelimpulse er-

zeugen (wie solche in der Impulstechnik erwünscht sind).

2) Leider besitzen die mit Glimmröhren erzeugten Kippschwingungen eine nur geringe Frequenzkonstanz. Ihre Amplitude ist zudem klein und mit steigender Frequenz abnehmend. Solche Schaltungen eignen sich daher nur für einfache Tongeneratoren (Glimmsummer), bei denen es nicht auf große Frequenzkonstanz und geringen Oberwellengehalt ankommt.

Für hochwertige Sägezahngeneratoren (wie dem "Subharmonischen Generator" beim Mixturautonium) kommt folglich die Bedingung hinzu, dass die exponentiell gekrümmten Sägezahn-schwingungen nachträglich linearisiert werden müssen, so dass sich letztlich eine verbesserte Schaltung mit anderen aktiven Elementen aufdrängt. Nebst der Glimmröhre kommt bspw. ein Kippschwinger mit Thyatron in Frage. Oder ein Multivibrator mit diskreten Transistoren oder auch ein Sperrschwinger.

1.2 Sägezahn-schwingungen mit dem Transitron

Sägezahn-schwingungen lassen sich nach dem Dynatron-Prinzip durch Röhren mit fallender Kennlinie erzeugen. Auch Röhren mit Sekundäremission verhalten sich in dem gewünschten Sinne. Zu diesen Schaltungsvarianten zählt das *Transitron*.

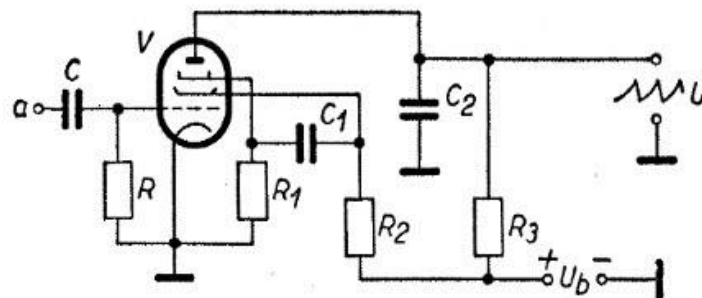


Abb. 2: Transitron

Zu einem bestimmten Zeitpunkt sei die Anodenspannung gering, so dass das Schirmgitter den vollen Kathodenstrom übernimmt. Die Schirmgitterspannung ist dann wegen des Spannungsabfalls an R_2 sehr klein. Steigt nun die Anodenspannung an und wächst über die Schirmgitterspannung hinaus, resultiert eine Stromübernahme zur Anode. Infolgedessen verringert sich der Schirmgitterstrom, dadurch steigt die Schirmgitterspannung. Dieser Anstieg überträgt sich über C_1 auf das Bremsgitter mit dem Widerstand R_1 und beschleunigt so die Stromübernahme zur Anode, so dass die Röhre sehr schnell in den Bereich kleiner Innenwiderstände getrieben wird. Sinkt nun die Anodenspannung ab, vollzieht sich der umgekehrte Vorgang. Es tritt Stromübernahme zum Schirmgitter ein, die Schirmgitterspannung fällt erneut mit der bereits bekannten Konsequenz, dass nun das Bremsgitter negativ wird und damit die nun umgekehrte Stromübernahme beschleunigt. Dadurch wird die Anode sehr schnell stromlos und damit in den Bereich eines hohen Innenwiderstandes getrieben.

Die für die Funktionsweise erforderlichen Zu- und Abnahmen der Anodenspannung erfolgen im Beispiel durch C_2 und R_3 . Die Aufladung des Kondensators erfolgt während der Röhren-Sperrzeit. Mit anwachsender Ladespannung gelangt die Anode zunehmend in den Bereich der Schirmgitterspannung, so dass die geschilderte Stromübernahme stattfindet. Nun entlädt

sich C2 über den kleinen Innenwiderstand der Pentode, dabei sinkt die Anodenspannung dermassen, dass der zweite Vorgang der Stromübernahme beginnen kann. Der dadurch sprungartig sich vergrößernde Röhreninnenwiderstand gestattet eine neuerliche Aufladung von C2 über R3, bis zur erneuten Übernahme des Kathodenstroms durch die Anode. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch mit dem Resultat der Erzeugung von Sägezahnspannungen.

1.3 Sägezahnspannungen mit dem Phantastron

1) Die etwas merkwürdige Bezeichnung *Phantastron* stammt aus dem Jargon englischer Funktechnikspezialisten und soll in etwa andeuten, dass die Schaltung "phantastisch" arbeitet. Das Phantastron eignet sich vorwiegend zur Erzeugung von Sägezahnspannungen extrem guter Linearität (wie dies bspw. für Kurzzeitmessungen in der Impulstechnik erforderlich ist). Nebst Sägezahnspannungen lassen sich auch solche mit trapezförmigen, dreieckigem und rechteckigem Verlauf erzeugen. Ferner eignen sich Phantastrons als Frequenzteiler. Es existieren an die 100 Schaltungsvarianten.

Die vorliegende Schaltungskombination besteht aus einem Miller-Integrator und einem Transitron. Dieses Miller-Transitron findet man häufig in Kathodenstrahloszillografen und in Radargeräten.

Bei diesem Phantastron-Typ erfolgt die für eine fortwährende Erzeugung von Sägezahnspannungen erforderliche Rückkopplung durch eine kapazitive Kopplung (C1) zwischen Schirmgitter und Bremsgitter.

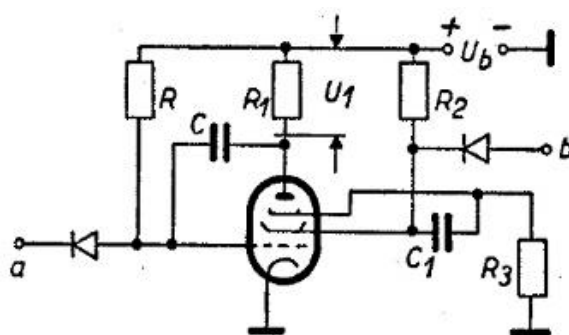


Abb. 3: Phantastron in Transitron-Schaltung

Bei stark negativem Bremsgitter ist zunächst kein Anodenstrom vorhanden, die Anodenspannung ist demzufolge hoch und die Schirmgitterspannung niedrig. Infolge fortschreitender Entladung von C1 wird jedoch das Bremsgitter positiver, so dass ein Anodenstrom einsetzen kann. In diesem Fall wirkt sich der Miller-Effekt aus, demzufolge der weitere Abfall der Anodenspannung durch den Kondensator C weitgehend linearisiert wird. Ist die Anodenspannung klein genug, setzt erneut Stromübernahme zum Schirmgitter ein. Das Bremsgitter wird über C1 negativ, weil die Schirmgitterspannung abrupt fällt; dies führt zu einem sprunghaften Anstieg der Anodenspannung auf den alten Wert. Danach beginnt wiederum der zeitlineare Miller-Abfall (Miller-run-down). Zur zusätzlichen Verbesserung der Linearisierung ist der Gitterwiderstand R mit dem Pluspol der Betriebsspannung verbunden.

2) Weiterentwicklung des Phantastrons sind:

2) Weiterentwicklung des Phantastrons sind:

a) Eine Schaltungsgruppe mit dem Namen *Sanatron* (von "sanus" = gesund), die mit mehreren gesteuerten Elektronenröhren arbeitet. Der linear abfallende Sägezahn mit kurzem Rücklauf besitzt eine grössere Amplitude, als dies beim Miller-Transitron der Fall ist.

b) Ein Derivat aus der Sanatrongruppe ist der *Sanaphant*, mit dem sich auch sehr langsame Kippschwingungen erzeugen lassen.

c) Eine Hilfsschaltung zu Phantastron- und Sanatronschaltungen ist der *Multiar*, welcher für die Messung kurzer Zeiten in Betracht kommt.

1.4 Linearisierungsschaltungen für Sägezahnspannungen

Wie bereits von der Glimmröhre bekannt, verläuft die Lade-/Entladekurve eines über einen ohmschen Widerstand angeschlossenen Kondensators nach einer e-Funktion. Für viele Anwendungen benötigt man jedoch einen zeitlinearen Anstieg oder Abfall des Sägezahns.

1) Bei einigen Röhrenschaltungen (Multivibrator und Sperrschwinger) lässt sich dies einfach dadurch realisieren, indem die Gitterwiderstände an den positiven Pol der Betriebsspannung angeschlossen werden. Mit dem Miller-Effekt liegt zudem ein Verfahren vor, das einen sehr linearen Flankenverlauf gestattet.

Die meisten Linearisierungsverfahren beruhen darauf, dass der Ladestrom eines Kondensators konstant gehalten wird, gemäss:

$$u = \frac{I}{C} \cdot t \quad \text{mit } I = \text{const}$$

Sind I und C konstant, erfolgt der Spannungsanstieg proportional zu t.

Die Kippfrequenz (bei periodischer Auf- und Entladung) ergibt sich bei Vernachlässigung der Rücklaufzeit zu:

$$f = \frac{I}{C \cdot U}$$

2) Eine dieser Möglichkeiten, den Kondensatorstrom konstant zu halten, besteht aus der Verwendung einer Pentode, deren Schirmgitterspannung über ein Potentiometer einstellbar ist.

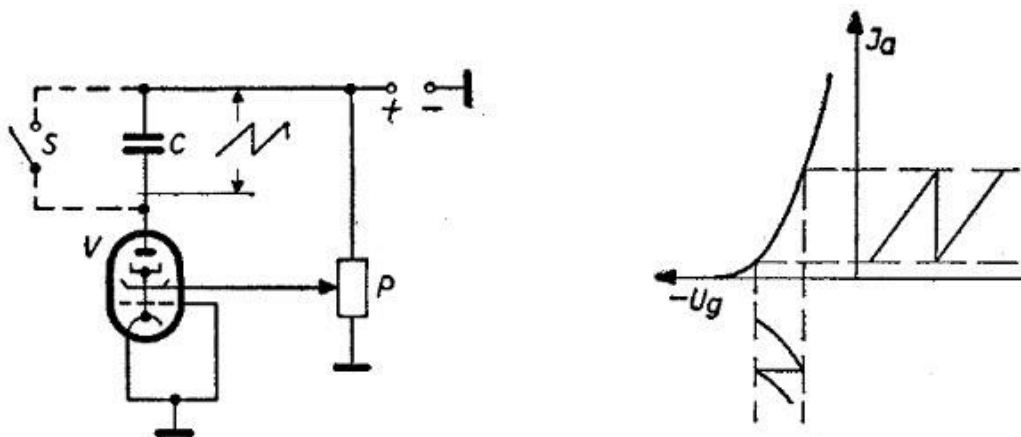


Abb. 4: Linearisierung mit Pentode

Die im Kontext relevante Kapazität liegt in der Anodenleitung, so dass die Aufladung über den Innenwiderstand der Röhre erfolgt. Weil dieser gross ist, bleibt der Ladestrom annähernd konstant (was auch aus dem Kennlinienbild ersichtlich ist). Innerhalb des konstanten Strombereichs erfolgt an der Kapazität somit ein linearer Spannungsanstieg. Die Entladung wird periodisch mit einem elektronischen Schalter (Kippschaltung) erzwungen.

3) Eine weitere Möglichkeit, die eine ausgezeichnete Linearisierung ermöglicht, besteht in der

Verwendung der Bootstrap-Schaltung.

Die Aufladung des Kondensators C erfolgt über die Widerstände R2 und R1 und würde norma-

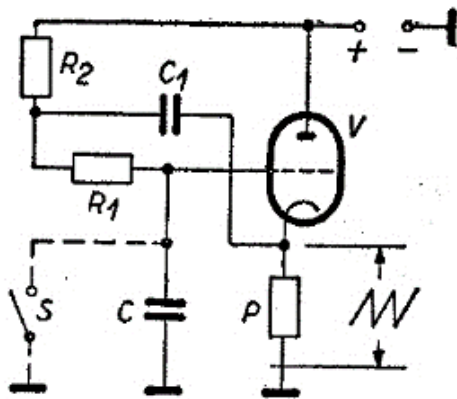


Abb. 5: Linearisierung mittels Bootstrap-Effekt

lerweise exponentiell verlaufen. Weil jedoch der Verbindungspunkt von R1 und C mit dem Gitter einer Triode verbunden ist, findet eine Einflussnahme statt, in dem Sinne, dass mit steigender Kondensatorspannung auch die Spannung am Kathodenwiderstand P zunimmt. Dieser Spannungsanstieg wird über C1 an den Verbindungspunkt von R2 und R1 übertragen und so der Ladespannung aufsummiert. Ohne diesen Kunstgriff bliebe der Ladestrom nicht konstant. Man erhält damit an C (und folglich auch an P) eine zeitlinear ansteigende

Spannung. Ein weiterer Vorteil bei dieser Schaltung ist in dem geringen Ausgangswiderstand ($\sim 1/S$) zu erkennen.

Anm.: Einige mögen sich darüber wundern, dass für exemplarische Beispiele oft die alten Röhrenschaltungen benutzt werden. Dies hat seine Berechtigung, deswegen, weil die Funktionsweise einer Schaltung mit Röhren oft leichter ersichtlich ist als mit Transistoren. Dies gilt besonders bei Verwendung hochintegrierter Schaltungen (die peripherisch nur noch wenige Bauteile benötigen, die bspw. der Einstellung der Verstärkung oder der Zeitbasis dienen), bei welchen der eigentliche Wirkungsablauf ohne zusätzliche Informationen nicht länger erkennbar ist. Dieser Nachteil entfällt bei Röhrenschaltungen, so dass der didaktische Erfolg, nämlich das Prinzipielle einer Schaltung möglichst einfach zu erfassen, erheblich vergrößert wird.

2 Frequenzmischung sinusförmiger Signale

2.1 Allgemeines

In der Regel wird in einem Mischer ein hochfrequentes Signal (RF) mit demjenigen eines Lokaloszillators (LO) additiv oder multiplikativ gemischt mit der Absicht einer Frequenztransponierung. Ist das zu mischende RF-Signal mit Sprache, Ton oder Bild moduliert, bleibt die Modulation auch nach der Mischung erhalten. Aus den resultierenden Signalen (Seitenbänder) wird in der Regel dasjenige des unteren Seitenbandes als sog. Zwischenfrequenz herausgesiebt.

In den Anfängen wurden als lokale Sinusgeneratoren sog. Meissneroszillatoren bzw. die davon abgeleitete Hartley- und Colpitts-Schaltung benutzt. Heute dienen frequenzstabile Quarzoszillatoren in Verbindung mit VCO's und PLL's als Ersatz.

2.2 Additive Mischung

Die Signale $X_{RF} = \sin(\omega t)$ und $X_{LO} = \sin(\omega_0 t)$ werden einem Bauteil mit nichtlinearer Kennlinie (Diode, Röhre, Transistor) zugeführt und so an einem gemeinsamen Bezugspunkt gemischt.

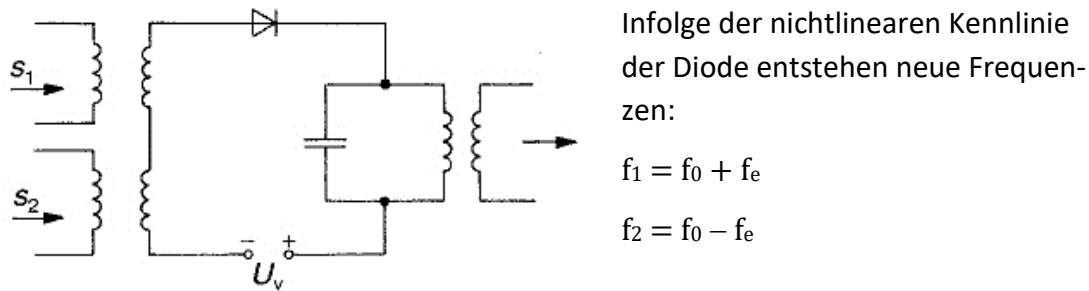


Abb. 6: Additive Mischung (Diodenmischer)

In praxi wird meist das Differenzsignal verarbeitet; dazu wird es mit einem Schwingkreis ausgesiebt und der nächsten Stufe zugeführt. Auch das Theremin verwendet das Differenzsignal. Mittels Tiefpass wird dort das Summensignal unterdrückt.

2.3 Multiplikative Mischung

Zur multiplikativen Mischung benötigt man ein aktives Bauelement mit zwei steuerbaren Eingängen, z.B. eine Elektronenröhre (Hexode, Heptode) oder einen Doppelgate-Feldeffekttransistor.

Im Superheterodyne-Empfänger (Superhet) wird das RF-Signal mit dem Sinus eines lokalen Oszillators (LO) gemischt.

$$X_{IF} = A \cdot \sin(\omega_e t) \cdot B \cdot \sin(\omega_0 t)$$

Die Differenzfrequenz $\Delta f = f_0 - f_e$ wird als Zwischenfrequenz (ZF) bezeichnet.

Bei dieser Mischungsart entstehen deutlich weniger Störfrequenzen als bei der additiven Mischung. Oszillatoreinstrahlungen in den Antennenkreis sowie Kreuzmodulationen sind gering. In zahlreichen Schaltungsvarianten hat die multiplikative Mischung deshalb auch Eingang in sämtliche FM-Radios gefunden.

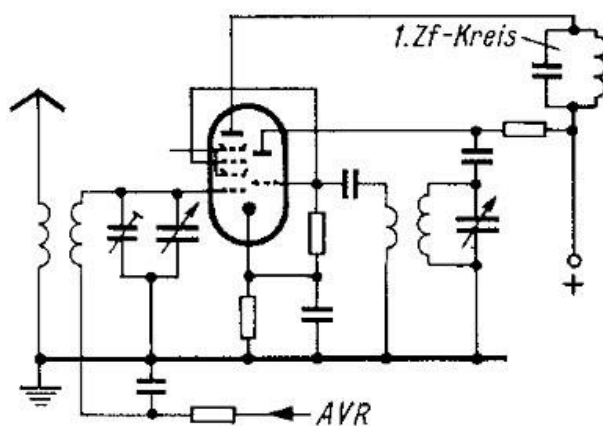


Abb. 7: Multiplikative Mischung mit Hexode-Triode

2.4 Homodyn- und Heterodynverfahren

a) beim Homodynverfahren haben LO- und RF-Signal die gleiche Frequenz. Das amplitudenmodulierte Empfangssignal wird direkt (ohne ZF) auf den NF-Bereich umgesetzt. Dabei findet eine Hilbert-Transformation statt. Dieses Prinzip kommt beim Direktempfänger zum Einsatz.

b) Beim Heterodynverfahren wird eine LO-Frequenz benutzt, die sich um einige 100 kHz (nämlich um den Betrag der ZF) von der HF unterscheidet. Der Vorteil des Heterodyne-Prinzips liegt darin, dass bei unterschiedlichen Eingangsfrequenzen stets eine einzige Zwischenfrequenz zur Verfügung steht, so dass hochwertige Filterstufen mit fester Frequenz eingesetzt werden können. Daraus resultiert eine deutlich höhere Trennschärfe. Im Unterschied dazu müssen beim Geradeausempfänger abstimmbare Bandfilter verwendet werden.

2.5 Superheterodyn-Prinzip

In Überlagerungsempfängern (Superhet's) wird das Ausgangssignal als Zwischenfrequenz (ZF) bezeichnet. Von Heruntermischen spricht man, wenn das Eingangssignal zusammen mit dem Oszillatorsignal auf eine tiefere Zwischenfrequenz gemischt wird.

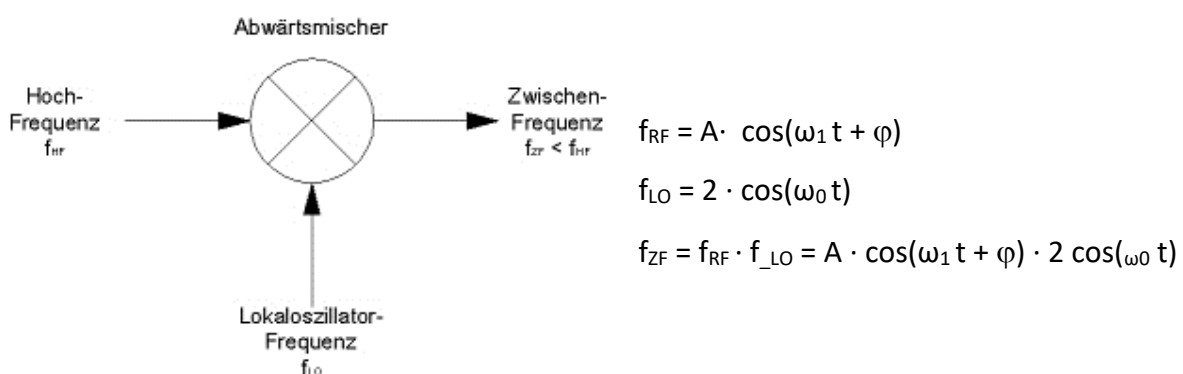


Abb. 8: Abwärtsmischer (Prinzip)

Der lokale Oszillator muss durch Verändern der Frequenz abstimmbar sein, um folgende Bedingung zu erfüllen: $ZF = LO \pm RF = \text{const.}$

Ist die Eingangsfrequenz grösser als die Oszillatorfrequenz, resultiert ein ZF-Signal in Gleichlage mit gleicher Frequenzfolge. Andernfalls resultiert ein ZF-Signal in Kehrlage mit invertierter Frequenzfolge.

Anm.: In der Radiotechnik hat sich der *Super heterodyne receiver* (Super und Mehrfachsuper) definitiv durchgesetzt. Als Erfinder dieser Technik gilt den einen Edwin Howard Armstrong, der seine Idee als Captain im U.S. Army Signal Corps im Jahre 1918 in Paris realisierte. Wenige Jahre zuvor hatte auch der französische Ingenieur Lucien Lévy einen Patenantrag eingereicht, der u.a. die grundlegenden Prinzipien des Überlagerungsempfangs beschrieb und dem dafür ein Patent zugesprochen wurde. Armstrong verkaufte seine Erfindung bzw. deren Rechte später an Westinghouse Electric. In den dreissiger Jahren entwickelte Armstrong die Frequenzmodulation (FM), welche für den UKW-Rundfunk massgebend wurde. Aufgrund anwachsender Eheprobleme und aus Zermürbnis infolge jahrelanger Rechtsstreitigkeiten mit RCA um das FM-Radio (und damit einhergehender finanzieller Engpässe) stürzte sich der Erfinder zu Beginn des Jahres 1954 in den Tod. Mit seiner pessimistischen Prognose "They will stall this thing until I am dead or broke" hatte er am Ende behalten. Profiteur war nebst der RCA auch Armstrongs Frau, welcher im Nachhinein eine hübsche Summe zugesprochen wurde.

3 Formanten

3.1 Historischer Exkurs

In seinem für die musikalische Akustik grundlegenden Werk unterschied bereits Helmholtz gemäss der Ohmschen Übertragung der Fourieranalyse auf die Akustik den einfachen Ton (Sinus) vom Klang, welcher als Überlagerung von mehreren Sinusschwingungen betrachtet wurde. Dabei hielt Helmholtz die Zusammensetzung der Obertöne bezüglich der Klangfarbempfindung für ausschlaggebend. Carl Stumpf war es dann, der frühe erkannte, dass die Klangfarbe nicht nur von der Teiltonstruktur abhängig ist, sondern auch von Ein- und Ausschwingvorgängen sowie Nebengeräuschen.

Zu einer weiteren Erhellung des Problems trug in aufschlussreicher Weise der Musikwissenschaftler und Physiker Karl Erich Schumann (1898-1985) in seiner Habilitationsschrift "Physik der Klangfarben" (1929) bei. Doch nur wenigen sind dessen Klangfarben- bzw. Formantgesetze wirklich bewusst. Dies mag auch daran liegen, weil Schumann während des 2. Weltkrieges eine organisatorisch bedeutsame Funktion im Ringen um die deutsche Kernwaffe einnahm und essentielles zum Hohlladungsprinzip beitrug. Mit der praktischen Umsetzung des Kernwaffenprogramms betraute er den Physiker Kurt Diebner. Nach Schumann hatten die beteiligten Wissenschaftler des HWA mit ihrer als "x-Zündung" bezeichneten Konfiguration einen Weg gefunden, um thermonukleare Reaktionen auszulösen. Nach dem Krieg wurde Schumann Leiter des Helmholtz-Instituts für Tonpsychologie und medizinische Akustik. Infolge der von den Alliierten erlassenen Kontrollratsgesetze war es Schumann aber nicht möglich, diesbezügliche Geheimpatente ordentlich registrieren zu lassen. Auch spätere Bemühungen blieben trotz Unterstützung des Bundesverteidigungsministeriums erfolglos.

Formanten bzw. deren Lagen und Ausprägungen bestimmen somit weitgehend die Klangfarbe eines Musikinstrumentes oder auch einer Stimme. Dabei handelt es sich um Resonanzen bestimmter Obertöne. Sie entstehen auf folgende Weise: Im Mundstück eines Blasinstrumentes bspw. wird zunächst ein Grundton mit zahlreichen Obertönen erzeugt. Im Klangkörper des Instrumentes wird aus diesem Spektrum ein Teil der Harmonischen (sog. Partialtöne) – als auch Rauschanteile – gedämpft, ein anderer Teil dagegen durch Resonanz verstärkt. Diejenigen Bereiche, bei denen eine maximale (relative) Verstärkung stattfindet, sind die Formanten. Instrumente, deren Hauptformanten an der gleichen Stelle liegen, werden daher leicht verwechselt, was der obig erwähnte Schumann am Beispiel von Horn und Fagott festgestellt hatte. Bei formantarmen Klängen hingegen ist die Einordnung des Klangs grösstenteils von Tonhöhe und Fluktuation abhängig. Hohe Celloklänge z.B. werden in den meisten Fällen für Geigenklänge gehalten, während tiefe Geigenklänge oft als Celloklänge wahrgenommen werden. In solchen Belangen lässt sich das menschliche Ohr gerne täuschen.

Die Bedeutung der Formantgesetze für die Instrumentierung eines Orchesters erkennt man u.a an der "Moonlight Serenade" (Glenn Miller), wo sich durch den Einsatz einer einzigen Klarinette (sic) dieses für das Slowfox-Stück charakteristische Timbre ergibt.¹

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Moonlight_Serenade

3.2 Formantfilter

Formantfilter sind – wie wir inzwischen wissen – das mächtigste Werkzeug des Trautoniums. In der Literatur werden sie auch als Resonanzfilter bezeichnet. Ihnen kommt die Aufgabe zu, diese speziellen Resonanzen zu betonen. Weil es sich in der Regel um mehrere Formanten pro Klang handelt, schaltet man mehrere Bandpass-Filter mit hohen Flankensteilheiten parallel. Technisch gesehen lassen sich Bandpässe durch die Hintereinanderschaltung eines Tiefpasses mit einem Hochpass realisieren. Ein Formant-Bereich ist demzufolge ein gefiltertes Mittenband.

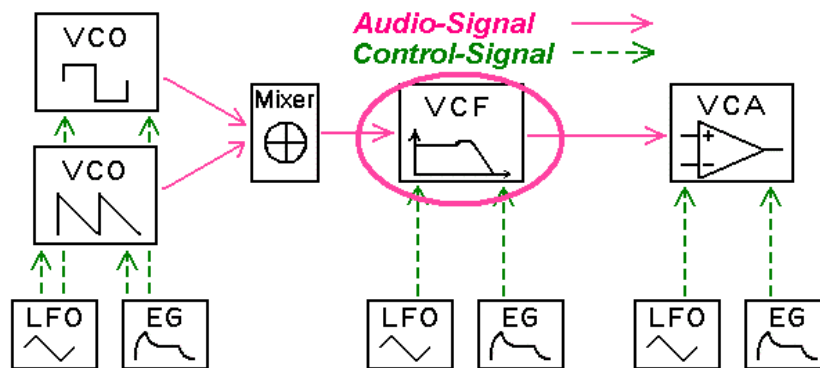


Abb. 9: Prinzipbeispiel der Klangsynthese durch eine analoge Filterschaltung (VCF)

Die Kürzel bedeuten:

- LFO = Low Frequency Oscillator (dient zur Modulation von klangformenden Komponenten)
- VCO = Voltage Controlled Oscillator; die Oszillatorfrequenz lässt sich mit einer Steuerspannung beeinflussen
- VCF = Voltage Controlled Filter; die Eckfrequenz (cut off) lässt sich mit einer Steuerspannung beeinflussen
- VCA = Voltage Controlled Amplifier; der Verstärkungsgrad wird durch eine Steuerspannung bestimmt
- EG = Envelope Generator (dient der Hüllkurvenerzeugung)

Fazit:

Auffällig ist nach allem bisher zu den elektronischen Musikinstrumenten Gesagten, dass in vielen Fällen respektable Physiker ihr umfangreiches Wissen in Theorie und Praxis beisteuerten und neuartige Musikinstrumente schufen.

4 Literatur

Heinz Richter: Neue Schule der Radiotechnik und Elektronik, 4 Bde. (Telekosmos)